

0-734088

На правах рукописи

**ЧЕРЕНКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВЫПУКЛЫХ  
ДНИЩ С ЛОКАЛЬНЫМИ  
ДЕФЕКТАМИ ФОРМЫ**

**05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность**

***АВТОРЕФЕРАТ***

***диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук***

**Казань 2001**

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Перелыгин О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Шарафиев Р.Г.,  
кандидат технических наук,  
доцент Рачков В.И.

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» (ОАО ВНИКТИнефтехимоборудование), г. Волгоград

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



Защита диссертации состоится 27 июня 2001 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.02 в Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ мая 2001 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Сироткин А.С.

### ***Общая характеристика работы***

Актуальность работы. Оценка остаточного ресурса сосудов и аппаратов, отработавших установленный срок эксплуатации на объектах Госгортехнадзора РФ, проводится по методике, согласно которой основное условие работоспособности оборудования состоит в том, что возникающие в конструкции эквивалентные напряжения не должны превосходить некоторых допускаемых для условий эксплуатации значений. При этом обычно предполагается, что коррозия металла является поверхностной и равномерной, а напряжения оцениваются в бездефектных сечениях.

Очевидно, что такой подход не учитывает особенности деформирования конструкций в зоне локального изменения их геометрии. Между тем реальные днища содержат исходные и развивающиеся в процессе эксплуатации дефекты, которые оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние материала конструкции. Эти дефекты, являясь концентраторами напряжений, могут вызывать резкое локальное изменение напряженно-деформированного состояния сосудов и, в большинстве случаев, определяют несущую способность оборудования и условия безопасной его эксплуатации.

Для оценки параметров безопасной эксплуатации оборудования на объектах Госгортехнадзора РФ необходимо располагать комплектом методических и программных документов, позволяющих анализировать как напряженно-деформированное состояние (НДС) сосудов и аппаратов в зоне локальных дефектов, так и несущую их способность.

В настоящее время в силу значительной сложности аналитических решений и высокой трудоемкости численных и экспериментальных исследований вопрос о концентрации напряжений в области локальных дефектов днищ является практически неизученным. Поэтому следует признать актуальным и отвечающим потребностям промышленной практики исследование, посвященное анализу НДС эллиптических днищ с локальными дефектами формы, поименованными, в частности, в ОСТ 26-291-94, и позволяющее оценивать несущую способность таких оболочечных конструкций.

Цель работы. Целью работы является разработка комплекта программ, позволяющих в компьютерном комплексе (КК) "ANSYS"

анализировать НДС выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы в упругопластической области, а также разработка методики, позволяющей оценивать несущую способность таких оболочек при статическом нагружении.

Научная новизна. Разработан пакет программ для оценки НДС выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы, позволяющий устанавливать основные закономерности процесса реального нагружения сосудов и выполнять их целенаправленный анализ.

Методами прикладной теории пластичности проанализированы условия возникновения локальных пластических шарниров в оболочечных конструкциях, и предложена оценка несущей способности оболочек с локальными дефектами формы при статическом и малоцикловом нагружении.\*

Практическая значимость. Практическая значимость работы состоит в том, что на базе разработанного комплекта программ может быть проведён анализ упругопластического деформирования выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы, поименованными в ОСТ 26-291-94.

По результатам этого анализа на основании предложенной оценки несущей способности оболочечных конструкций с локальными дефектами формы могут быть получены рекомендации по параметрам безопасной эксплуатации сосудов и аппаратов на объектах, подконтрольных Госгортехнадзору РФ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на Научной сессии КГТУ (Казань, 2000), на Международной научно-технической конференции "Технико-экономические проблемы промышленного производства" ТЭП-2000 (Н. Челны), на X Межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2000), на Всероссийской научной конференции «Тепло- и массообмен в химической технологии. ТМОХТ-2000» (Казань, 2000), на Международной научно-технической конференции

---

\* Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Серазутдинову М.Н., который являлся консультантом по вопросам оценки несущей способности оболочек.

«Испытания материалов и конструкций» (Н. Новгород. 2000), а также в ряде организаций, проявивших интерес к результатам работы: КГУ (г. Казань), НИИХиммаш (г. Москва) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ и тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования, и приложений. Основная часть работы изложена на 151 страницах машинописного текста. Работа содержит 49 рисунков и 27 таблиц.

### ***Содержание работы***

Во введении обоснована актуальность темы и формулируется цель работы.

В первой главе приводится краткий анализ публикаций, посвящённых методам расчета оболочек сложной геометрии. Отмечается, что наиболее универсальным и эффективным способом расчета НДС оболочек сложной геометрии является метод конечных элементов (МКЭ). Указывается, что среди пакетов прикладных программ и компьютерных комплексов, созданных на основе МКЭ, весьма развитым в плане сервисной части и удобства работы пользователя является КК «ANSYS».

Проанализированы работы, посвященные экспериментальным и численным исследованиям НДС бездефектных днищ и НДС днищ с локальными дефектами геометрии и, в частности, сферических резервуаров с круглыми в плане вмятинами, а также оценки статической и малоцикловой прочности сосудов и аппаратов, содержащих дефекты и концентраторы напряжений. Показано, что наиболее часто в практике инженерных расчетов для оценки статической прочности сосудов и аппаратов, содержащих дефекты и концентраторы напряжений, применяются методы теории предельного равновесия и деформационные критерии механики разрушения.

В конце главы делаются выводы, главный из которых состоит в том, что в настоящее время оценка прочности оболочек с локальными дефектами и концентраторами напряжений при статической нагрузке проводится на основе упрощенного решения задачи о несущей способности оболочки, как бруса прямоугольного сечения под действием осевой силы и изгибающего момента.

Во второй главе рассматривается конечно-элементное моделирование процесса упругого и упругопластического деформирования выпуклых днищ с локальными дефектами геометрии при упругопластическом деформировании в среде КК «ANSYS».

Предложен алгоритм формирования электронного образа выпуклых отбортованных днищ (эллиптического и торосферического) с локальными дефектами формы, поименованными в ОСТ 26 291 – 94. Предложенный алгоритм реализован и апробирован на языке параметрического проектирования КК “ANSYS” - APDL.

При построении двумерной модели эллиптического днища с локальными дефектами формы считается, что начало декартовой системы координат расположено на оси симметрии в плоскости перехода эллипсоида в цилиндрическую отбортовку, а ось  $y$  направлена по оси симметрии. В этом случае координаты точек образующей определяются по формулам:

$$x = \left( \frac{D}{2} \pm \frac{s}{2} + \Delta r \right) \sin \varphi,$$

$$y = \left( H \pm \frac{s}{2} + \Delta R \right) \cos \varphi$$

для образующей эллипсоида днища, и

$$x = \frac{-\tilde{h}}{h} \Delta m + \frac{h + \tilde{h}}{h} \Delta r + \frac{D}{2} \pm \frac{s}{2},$$

$$y = \tilde{h}$$

для цилиндрической отбортовки. Здесь угол  $\varphi$  отсчитывается от положительного направления оси  $y$  по часовой стрелке,  $\tilde{h}$  - текущая ордината точки цилиндрической отбортовки.

Построение геометрической модели торосферического днища выполняется практически идентично. Отличие будет заключаться только в определении координат точек образующей днища.

Считая, что начало декартовой системы координат расположено на оси симметрии в плоскости перехода криволинейной части днища в цилиндрическую отбортовку, а ось  $y$  направлена по оси симметрии

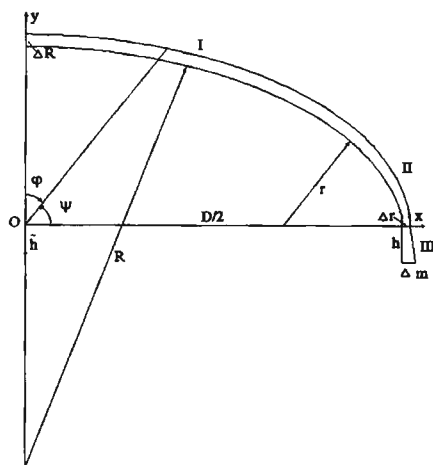


Рис.1

(рис.1), координаты точек образующей можно определить по формулам:

$$x = \left\{ \left[ (R + \Delta R) \frac{\alpha - \varphi}{\alpha} + \left( R + \frac{\Delta R + \Delta r}{2} \right) \frac{\varphi}{\alpha} \right] \pm \frac{s}{2} \right\} \sin \varphi,$$

$$y = \left\{ \left[ (R + \Delta R) \frac{\alpha - \varphi}{\alpha} + \left( R + \frac{\Delta R + \Delta r}{2} \right) \frac{\varphi}{\alpha} \right] \pm \frac{s}{2} \right\} \cos \varphi + H - R - \Delta R$$

в зоне I (рис.1),

$$x = \left\{ \left[ (r + \Delta r) \frac{\beta - \psi}{\beta} + \left( r + \frac{\Delta R + \Delta r}{2} \right) \frac{\psi}{\beta} \right] \pm \frac{s}{2} \right\} \cos \psi + \frac{D}{2} - r - \Delta r,$$

$$y = \left\{ \left[ (r + \Delta r) \frac{\beta - \psi}{\beta} + \left( r + \frac{\Delta R + \Delta r}{2} \right) \frac{\psi}{\beta} \right] \pm \frac{s}{2} \right\} \sin \psi$$

в зоне II (рис.1),

$$x = \frac{-\tilde{h}}{h} \Delta m + \frac{h + \tilde{h}}{h} \Delta r + \frac{D}{2} \pm \frac{s}{2},$$

$$y = \tilde{h}$$

в зоне III (рис.1).

Здесь угол  $\varphi$  отсчитывается от положительного направления оси  $y$  по часовой стрелке, угол  $\Psi$  отсчитывается от положительного направления оси  $x$  против часовой стрелке,  $\tilde{h}$  - текущая ордината точки цилиндрической отбортовки, а углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны:

$$\alpha = \arctg \frac{D/2 - r}{R - H}, \quad \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Знак плюс перед толщиной оболочки  $s$  означает, что определяются координаты точек срединной поверхности оболочки по заданным внутренним базовым размерам, знак минус – по наружным.

Таким образом, в процедуру построения геометрии вводятся поименованные в ОСТ 26-291-94 локальные дефекты формы выпуклых днищ.

В работе формулируется также задача построения вмятин на выпуклых днищах путем локального упругого деформирования части их поверхности. Для этого закрепляются узлы, расположенные на периметре вмятины (обнуляются значения узловых перемещений, принадлежащих этим узлам), а определенные экспериментально (или задаваемые аналитически) глубины вмятины пересчитываются к перемещениям соответствующих узлов, расположенных в зоне вмятины. Затем решается задача упругого деформирования зоны вмятины днища по заданным нулевым (по периметру вмятины) и ненулевым (в ряде узлов внутри зоны вмятины) узловым перемещениям. Найденные перемещения узлов, расположенных в зоне вмятины, и определяют форму вмятины.

В работе также обсуждаются и исследуются проблемы выбора основного расчетного конечного элемента и дискретизации выпуклого отбортованного днища с локальными дефектами, находящегося под действием внутреннего давления.



Таблица 1

Зависимость величины эквивалентных напряжений от числа узлов дискретизации конструкции

I способ дискретизации		II способ дискретизации		III способ дискретизации		IV способ дискретизации	
Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)
385	187	427	193	426	182	486	190
1790	172	1944	179	1994	171	2102	176
4578	171	4879	175	4789	170	4976	173
7637	170	8012	173	8125	170	8344	171
10354	170	10988	172	11033	170	11240	171

Таблица 2

Зависимость величины эквивалентных напряжений от числа узлов дискретизации конструкции

SHELL63 четырёхугольный		SHELL63 треугольный		SHELL93 четырёхугольный		SHELL93 треугольный	
Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)	Число узлов	$\sigma_i$ (МПа)
385	187	408	198	577	189	622	193
1790	172	1876	176	2164	182	2389	184
4578	171	4904	172	5890	177	6023	178
7637	170	7946	170	8643	176	8943	176
10354	170	11367	170	13673	175	14277	175

Проведен анализ точности и сходимости конечно-элементного расчета на прочность днищ для различных типов конечных элементов, и на основе линейного четырехугольного конечного элемента, проведены исследования по выбору конечно-элементной схемы разбиения конструкции при анализе НДС выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы. Результаты этих исследований представлены в таблицах 1, 2.

По результатам численных исследований, приведенных в таблицах 1 и 2, определена оптимальная схема дискретизации и тип расчетного конечного элемента для задачи упругопластического деформирования выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы.

Как и следовало ожидать, из результатов расчетов следует, что линейный треугольный конечный элемент дает менее точные результаты, чем соответствующий четырехугольный при прочих равных условиях. Наиболее точным следует признать первый способ дискретизации. Второй способ дает сильно заниженные результаты, а третий практически мало отличается от первого, но его использование требует большего ресурса РС.

В третьей главе рассмотрен вывод критерия оценки несущей способности выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы. Критерий предполагает появление в оболочках локальных пластических шарниров.

В этом случае соотношения между  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  - нормальными и касательными напряжениями, действующими в сечениях оболочки, и  $\sigma_T$  - пределом текучести могут быть записаны следующим образом:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_T^2 \quad (-s/2 \leq z \leq s/2). \quad (3)$$

Здесь  $z$  - координаты точек по нормали к срединной её поверхности оболочки.

Поскольку с возникновением пластических деформаций, закон изменения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  по толщине оболочки неизвестен, постулировалось, что эти напряжения по  $z$  можно аппроксимировать некоторым среднеинтегральным их значением.

В этом случае с учетом известных соотношений между усилиями  $N_x, N_y, N_{xy}$ , моментами  $M_x, M_y, M_{xy}$  и вызываемыми ими напряжениями, условие (3) для растянутого и сжатого слоя оболочки после преобразований принимает следующий вид:

$$\left(\frac{N_x}{s} + \frac{2M_x}{sd_1}\right)^2 - \left(\frac{N_x}{s} + \frac{2M_x}{sd_1}\right)\left(\frac{N_y}{s} + \frac{2M_y}{sd_1}\right) + \left(\frac{N_y}{s} + \frac{2M_y}{sd_1}\right)^2 + 3\left(\frac{N_{xy}}{s} + \frac{2M_{xy}}{sd_1}\right)^2 = \sigma_T^2; \quad (4)$$

$$\left(\frac{N_x}{s} - \frac{2M_x}{s(s-d_1)}\right)^2 - \left(\frac{N_x}{s} - \frac{2M_x}{s(s-d_1)}\right)\left(\frac{N_y}{s} - \frac{2M_y}{s(s-d_1)}\right) + \left(\frac{N_y}{s} - \frac{2M_y}{s(s-d_1)}\right)^2 + 3\left(\frac{N_{xy}}{s} - \frac{2M_{xy}}{s(s-d_1)}\right)^2 = \sigma_T^2.$$

В работе показано, что вместо усилий и моментов в уравнениях (4) можно использовать величины изгибных и мембранных напряжений, и предложен алгоритм нахождения по результатам исследования НДС оболочек в упругой области некоторого внутреннего давления  $p_{nl}$ , при котором в оболочке возникает локальный пластический шарнир.

Показано, что в этом случае:

$$F_{1\sigma}(\sigma_x^{1M}, \sigma_y^{1M}, \tau_{xy}^{1M}, \sigma_x^{1u}, \sigma_y^{1u}, \tau_{xy}^{1u}, d_1)^2 - p_{nl}^2 = \sigma_T^2;$$

$$F_{1\sigma}(\sigma_x^{1M}, \sigma_y^{1M}, \tau_{xy}^{1M}, \sigma_x^{1u}, \sigma_y^{1u}, \tau_{xy}^{1u}, d_1) = (\sigma_x^{1M} + \sigma_x^{1u}s/3d_1)^2 - (\sigma_x^{1M} + \sigma_x^{1u}s/3d_1)(\sigma_y^{1M} + \sigma_y^{1u}s/3d_1) + (\sigma_y^{1M} + \sigma_y^{1u}s/3d_1)^2 + 3(\tau_{xy}^{1M} + \tau_{xy}^{1u}s/3d_1)^2.$$

При вычислении напряжений предполагается, что:

$$\begin{aligned} \sigma_x^M &= p_{nl}\sigma_x^{1M}, & \sigma_y^M &= p_{nl}\sigma_y^{1M}, & \tau_{xy}^M &= p_{nl}\tau_{xy}^{1M}, \\ \sigma_x^u &= p_{nl}\sigma_x^{1u}, & \sigma_y^u &= p_{nl}\sigma_y^{1u}, & \tau_{xy}^u &= p_{nl}\tau_{xy}^{1u}. \end{aligned}$$

Здесь  $\sigma_x^{1m}, \sigma_y^{1m}, \tau_{xy}^{1m}$  - мембранные, а  $\sigma_x^{1u}, \sigma_y^{1u}, \tau_{xy}^{1u}$  - изгибные составляющие напряжений от единичной нагрузки, найденные по результатам исследования НДС оболочек в упругой области.

В работе представлены результаты расчетов предельных нагрузок для некоторых оболочечных конструкций по предлагаемому критерию. Показано, что в частных случаях, полученные с его использованием результаты совпадают с известными в литературе величинами. На основе численного эксперимента также установлено, что предельная нагрузка  $p_{пл}$ , рассчитанная из условия возникновения в оболочке локальных пластических шарниров на 17% - 66% превышает предельную нагрузку  $p^y$ , определенную из решения упругой задачи. Кроме того установлено, что предельная нагрузка  $p_{пл}$ , рассчитанная по предлагаемому критерию хорошо совпадает с результатами, полученными в диссертационной работе Р. Х. Зайнуллина (2000). Численным экспериментом показано также, что при возрастании внутреннего давления  $p$  в днище пластические деформации возникают вначале в зоне сопряжения эллипсоида с цилиндрической отбортовкой, а затем, с увеличением внутреннего давления  $p$ , зона пластических деформаций видоизменяется, и пластический шарнир возникает в полюсе днища, а не в области сопряжения оболочек.

В четвертой главе проведено исследование НДС выпуклых днищ с локальными дефектами при упругом и упругопластическом деформировании.

Для оценки точности и достоверности результатов исследований НДС днищ, получаемых на основе КК "ANSYS", проводилось их сопоставление с экспериментальными данными и результатами расчетов, выполненных с применением различных конечно-элементных пакетов, и в частности с данными ЛенНИИХиммаша, КГТУ и КГТУ им. Туполева.

Численные эксперименты иллюстрируют хорошую сходимость найденного в ходе исследований распределения меридионального и кольцевого напряжений со значениями, полученными для аналогичных условий другими исследователями, и это позволяет использовать КК «ANSYS» для анализа НДС как бездефектных эллиптических и тороидальных днищ, так и для днищ с локальными дефектами формы.

На рис. 2 и 3 показано распределение кольцевых напряжений на наружной  $\sigma_{1n}$  (кривая 1) и на внутренней  $\sigma_{1в}$  поверхности дна (кривая 2), сопряженного с длинной цилиндрической оболочкой той же толщины, что и дно. Кривая 3 на этих рисунках показывает характер распределения эквивалентных растягивающих напряжений ( $\sigma_p$ ) в дне, а кривая 4 – изгибающих ( $\sigma_{из}$ ). Кривая 5 свидетельствует об изменении комплекса  $K = 2\sigma_{из}/(3\sigma_T) + \sigma_p^2/\sigma_T^2$  вдоль меридиана дна.

Как следует из рис. 2 и 3, при нагрузке 1,6 МПа область перехода является более нагруженной ( $K=0,27$ ) по сравнению с вершиной дна ( $K=0,23$ ), но при нагрузке в 3,2 МПа более нагруженной уже является вершина дна ( $K=0,89$ ), а не область перехода ( $K=0,83$ ). При дальнейшем увеличении внутреннего давления вершина будет продолжать оставаться наиболее нагруженной зоной дна, и разрушение оболочки произойдет в её полюсе.

Как известно, при штамповке эллиптических дн наблюдается утонение стенки по сравнению с толщиной исходной заготовки. В настоящей работе совместно с АО «НИИХиммаш» проведены исследования прочности дн, утонение которых в зоне отбортовки значительно выше, чем при штамповке стандартных дн. Это достигалось за счет предварительного утонения заготовок.

В ходе эксперимента замерялись деформации на наружной поверхности дна в пяти его точках.

Как показывают численные исследования, эпюры тангенциальных и радиальных деформаций в днах, полученные в ходе этих исследований дн, а также результаты тензометрирования дн в экспериментальных наблюдениях хорошо согласуются между собой, и это позволяет считать, что разработанная программа упругопластического деформирования дн адекватно описывает этот процесс в области пластических деформаций.

Как известно, по ОСТ 26-291-94 высота отдельной сферической вмятины (вогнутости) или выпучины (выпуклости) на эллиптическом

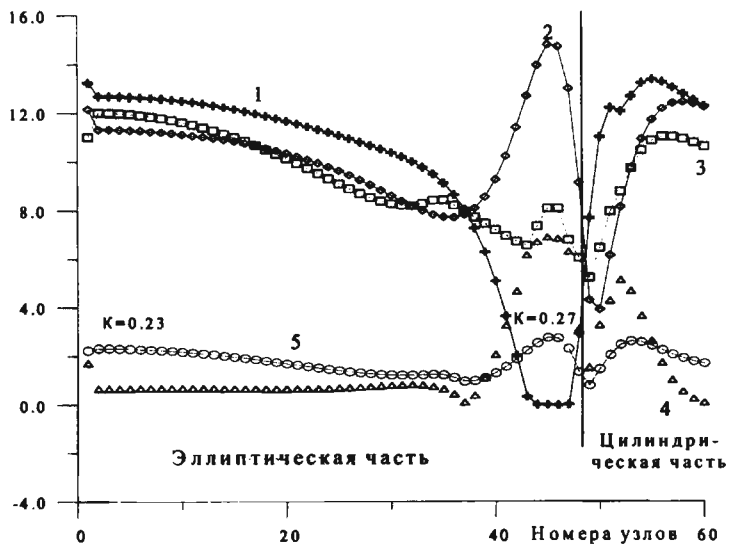


Рис.2. Распределение напряжений в днище при  $p=1,6$  МПа

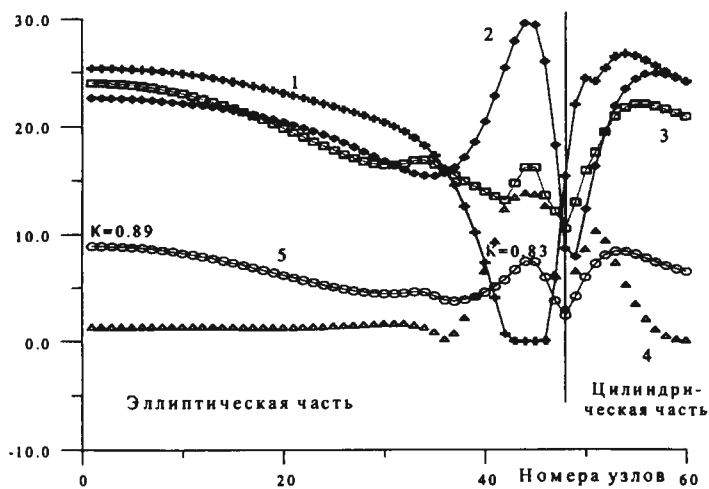


Рис.3. Распределение напряжений в днище при  $p=3,2$  МПа

днище не должны превышать 6 мм. Однако при проведении экспертизы остаточной работоспособности сосудов и аппаратов приходится анализировать на эллиптических и торосферических днищах вмятины и выпучины, параметры которых превосходят указанные в ОСТ 26-291-94 предельные значения.

Поэтому в работе проведены также исследования НДС торосферических днищ с круглыми в плане вмятинами. В таблице 3 приведено сравнение результатов расчетной оценки прочности днищ с вмятинами, выполненных по предлагаемой программе в КК «ANSYS» ( $\alpha_{\sigma \text{ ANS}}$ ), с данными натурного тензометрирования сферических оболочек с вмятинами Криогенмашем ( $\alpha_{\sigma^*}$ ), и с данными, полученными на кафедре сопромата КГТУ ( $\alpha_{\sigma^{**}}$ ).

Таблица 3

Результатов расчетной оценки прочности днищ с вмятинами

$R$ , мм	$s$ , мм	$p$ , МПа	$r_{\text{в}}$ , мм	$f$ , мм	$\alpha_{\sigma \text{ ANS}}$	$\alpha_{\sigma^*}$	$\alpha_{\sigma^{**}}$
450	6	0,9	75	10	4.20	4.03	3.98
800	14	1,5	133	21	3.81	3.68	3.88
1000	20	1,7	167	30	3.65	3.62	3.80
1600	18	2,0	165	18	3.07	3.32	3.12
2000	10	0,6	174	20	3.72	4.10	3.88

Как следует из таблицы 3, результаты анализа НДС сферических днищ с круглыми в плане вмятинами, полученные с использованием КК «ANSYS» хорошо согласуются с результатами, полученными по различным пакетам МКЭ, и с данными экспериментальных наблюдений. Численные эксперименты иллюстрируют не только хорошую сходимость найденных коэффициентов концентрации напряжений со значениями, полученными для аналогичных условий другими исследователями, но и качественное совпадение картины деформирования.

В работе исследовалось также влияние глубины  $f_{\text{в}}$  вмятины, ее радиуса  $r_{\text{в}}$ , удаления проекции центра вмятины на недеформирован-

ную оболочку от оси симметрии оболочки  $x_0$ , овальности вмятины  $d$  (отношения большей полуоси вмятины к меньшей), а также угла ориентации вмятины  $\alpha_0$  на НДС эллиптических и торосферических днищ.

Исследования показали, что увеличение степени эллиптичности вмятины ведет к снижению прочности оболочки, причем наибольшее снижение прочности происходит в случае, если вмятина расположена в зонах наибольшей концентрации эквивалентных напряжений для бездефектного днища. Наиболее неблагоприятным (с точки зрения прочности) является расположение эллиптической вмятины под углом  $\alpha_0$  порядка 70 градусов к радиусу, соединяющему полюс днища и центр вмятины. Исследования также показывают на большую разницу напряжений на наружной и внутренней поверхности днищ, что указывает на наличие в оболочке значительных изгибных напряжений.

Численные исследования влияния нормируемых локальных дефектов на НДС выпуклых днищ проводились для стандартных эллиптических и торосферических днищ. Исследовалось влияние изменения наибольшего  $\Delta R$  и наименьшего  $\Delta r$  радиусов кривизны днища, а также увода нижней кромки цилиндрической отбортовки  $\Delta m$  на НДС оболочки. Пределы допускаемых изменений вышеназванных величин составляли:

$$0 \text{ мм} \geq \Delta R \geq 8 \text{ мм}, \quad 0 \text{ мм} \geq \Delta r \geq 4 \text{ мм}, \quad 0 \text{ мм} \geq \Delta m \geq 4 \text{ мм}.$$

Как и следовало ожидать, НДС выпуклых днищ в большей степени зависит от изменения наибольшего  $\Delta R$  и наименьшего  $\Delta r$  радиусов кривизны днища, и в меньшей - от величины увода нижней кромки цилиндрической отбортовки -  $\Delta m$ .

На рис. 4 и 5 представлены результаты анализа НДС торосферических и эллиптических днищ с локальными дефектами, поименованными в ОСТ 26-291-94. Внутренний диаметр днища и длина цилиндрической оболочки принимались равными 300 мм, толщина  $s$  - 10 мм, изменение наибольшего радиуса  $\Delta R$  и наименьшего  $\Delta r$  составляли - 8 мм и - 4 мм, соответственно. В диапазоне  $0,6R$  -  $0,8R$  имело утонение  $0,1s$ , увод нижней кромки цилиндрической отбортовки  $\Delta m$  составлял 4 мм.



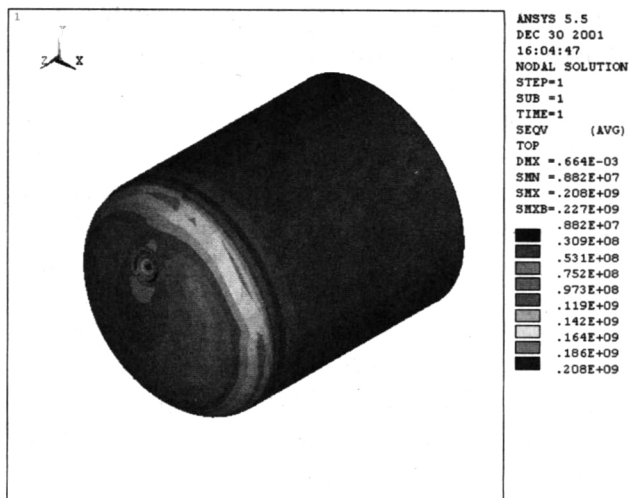


Рис. 4. Распределение напряжений на наружной поверхности эллиптического днища с круглой в плане вмятиной

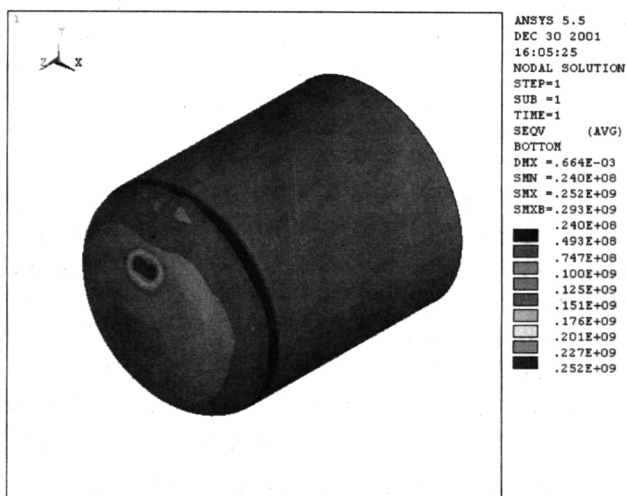


Рис. 5. Распределение напряжений на внутренней поверхности эллиптического днища с круглой в плане вмятиной

На расстоянии  $x = 0,75R$  от центра днище имело вмятину с соотношением полуосей 1:3, и с размером большей полуоси  $r = 40$  мм. Эта ось была повернута относительно радиуса, соединяющего вершину днища и центр вмятины, на угол  $75^\circ$ . Глубина вмятины составляла 20 мм. Оболочка нагружалась внутренним давлением  $p = 4$  МПа.

Проведенные исследования показывают, что построенная расчетная процедура позволяет эффективно решать задачи анализа упругого деформирования выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами геометрии. Работа в среде ППП ANSYS позволяет значительно сократить время создания конечно-элементной модели конструкции и отладки процедуры решения. Разработанные программы могут быть эффективно использованы при оценке прочности выпуклых отбортованных днищ с локальными дефектами формы, в ходе анализа остаточного ресурса сосудов и аппаратов на объектах, подведомственных Госгортехнадзору РФ.

### ***Основные выводы и результаты***

1. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время отсутствуют работы, посвященные экспериментальным и численным исследованиям НДС выпуклых днищ с локальными дефектами формы, а для оценки статической прочности сосудов с такими дефектами НИИХиммаш рекомендует упрощенное решение задачи о несущей способности оболочки, как бруса единичной ширины и прямоугольного сечения.

2. Предложен электронный образ выпуклых днищ с локальными дефектами формы в среде КК «ANSYS», и разработана процедура решения задачи упругопластического деформирования выпуклых днищ с локальными дефектами формы. Проведены численные исследования, позволяющие определить оптимальную схему дискретизации и тип расчетного конечного элемента для такого рода задач.

4. Предложен уточнённый критерий оценки несущей способности  $p_{пл}$  для оболочки с локальными дефектами, который предполагает возникновение в ней локальных пластических шарниров.

5. Показано, что результаты анализа НДС бездефектных эллиптических днищ в КК «ANSYS» хорошо согласуются с результатами, полученными по различным пакетам МКЭ, и с данными эксперимен-

тальных наблюдений. Численно установлено, что под действием внутреннего давления пластические деформации возникают вначале в зоне сопряжения эллипсоида с отбортовкой, а затем, с увеличением внутреннего давления, зона пластических деформаций видоизменяется, и пластический шарнир возникает не в области сопряжения, а в полюсе днищ, где и происходит их разрушение.

6. Исследовано НДС эллиптических днищ, имеющих утонение стенки в зонах наибольшей вытяжки при штамповке. Проведено сравнение рассчитанных кривых деформирования днищ с экспериментальными данными ОАО «НИИХиммаш» и показано, что рассчитанное по КК «ANSYS» упругопластическое деформирование выпуклых днищ с утонением хорошо согласуется с данными эксперимента.

7. Проведён сравнительный анализ упругопластического деформирования выпуклых днищ с вмятинами, отмечено хорошее совпадение полученных при этом результатов с экспериментальными данными. Показано, что разработанная в среде КК «ANSYS» процедура анализа НДС выпуклых днищ с локальными дефектами и концентраторами напряжений, позволяет успешно решать задачи прочностного анализа сосудов и аппаратов в условиях статического и малоциклового нагружения при определении параметров их безопасной эксплуатации.

### *Обозначения*

$d$  - длина вмятины, отнесенная к её диаметру;  $f$  - глубина вмятины,  $M$  - изгибающий момент,  $N$  - нормальное усилие,  $p$  - внутреннее избыточное давление,  $R$  - внутренний радиус оболочки,  $r_g$  - радиус основания вмятины,  $r$  - радиус сопряжения эллипсоида и отбортовки,  $s$  - толщина оболочки,  $\Delta m$  - увод нижней кромки цилиндрической отбортовки,  $x, y, z$  - координаты,  $\sigma$  - нормальное напряжение,  $\tau$  - касательное напряжение,  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - напряжения, действующие во взаимно перпендикулярных сечениях оболочки,  $\sigma_x^M, \sigma_y^M, \tau_{xy}^M$  - мембранные составляющие напряжений,  $\sigma_x^u, \sigma_y^u, \tau_{xy}^u$  - изгибные составляющие напряжений,  $\sigma_T$  - минимальное значение предела текучести при расчетной температуре.

***Основные положения диссертации опубликованы в работах:***

1. Перельгин О.А., Черенков А.В., Сопин В.Ф., Закиев Ф.К. Исследование напряжённно-деформированного состояния эллиптических днищ Вестник Казанского технологического университета. N 1-2. 1999.С.52-57.
2. Черенков А.В., Перельгин О.А., Закиев Ф.К. Анализ напряжённно-деформированного состояния эллиптических днищ в ППП "ANSYS". Научная сессия КГТУ. Аннотация сообщений. Казань. 2000. С.86.
3. Перельгин О.А., Черенков А.В., Серазутдинов М.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния выпуклых днищ в ППП «ANSYS». Техничко – экономические проблемы промышленного производства: Тезисы докладов. Н.Челны. 2000. С.52.
4. Серазутдинов М.Н., Перельгин О.А., Черенков А.В., Малахов В.Г. Пластические деформации и разрушение тонкостенных конструкций. Математическое моделирование и краевые задачи. Труды X межвузовской конференции. Самара. 2000. С. 149-152.
5. Серазутдинов М.Н., Черенков А.В., Перельгин О.А. Оценка несущей способности оболочек неидеального исполнения. Всероссийская научная конференция «Тепло- и массообмен в химической технологии. ТМОХТ-2000» Сб. Тезисы докладов. КГТУ. С.184.
6. Серазутдинов М.Н., Перельгин О.А., Черенков А.В. Критерий прочности тонкостенных конструкций при пластических деформациях. Международная научно-техническая конференция «Испытания материалов и конструкций» Тезисы докладов. Н.Новгород. 2000. С. 97.
7. Серазутдинов М.Н., Перельгин О.А., Черенков А.В. Условие прочности оболочек при пластических деформациях. Вестник Ульяновского государственного технического университета. №2. 2000. С.101-108.

Соискатель

А.В. Черенков

Издательство «Карпол», 2001 г. Республика Татарстан,  
420095, г. Казань, ул. Восстания, 100  
Лицензия на издательскую деятельность № 176 от 18.11.96.  
Министерства информации и печати РТ

---

Подписано в печать 14.05.2001. Готовый оригинал-макет.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Форма 60х90 1/16 Гарнитура Times. Усл. п.л. 1,2.  
Типаж 150 экз. Заказ № 661

---

Отпечатано в типографии ОАО «Карпол»  
420095, Казань, ул. Восстания, 100





